

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO TÉRMICA E MICROESTRUTURAL DE JUNTAS DE FILETE COM CHAPAS DE
DIFERENTES ESPESSURAS

por

Elisandro Pagnussat

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Julho de 2013.

AVALIAÇÃO TÉRMICA E MICROESTRUTURAL DE JUNTAS DE FILETE COM CHAPAS DE
DIFERENTES ESPESSURAS.

por

Elisandro Pagnussat

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^ª. Dr^ª. Thamy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. José Antônio E. Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Flávio José Lorini

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 05, Julho de 2013.

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais, Sérgio Pagnussat e Claci Pagnussat, e a minha namorada Jéssica Pelissari.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos funcionários da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), professores, técnicos, administrativos, que de uma forma ou outra contribuíram para a minha formação.

Agradeço, também, ao meu orientador neste Trabalho de Conclusão de Curso, professor José Antônio E. Mazzaferro, pela atenção, pela dedicação e pelo tempo empregado durante a realização.

Aos meus pais, que sempre demonstraram muito esforço e dedicação em minha educação, fatores que me permitiram diversas conquistas; pelo suporte e pelo entendimento das minhas escolhas e pelo amor e atenção que sempre me dedicaram.

Às minhas irmãs, um agradecimento especial, por serem um exemplo, além de conselheiras e grande amigas nessa trajetória.

À minha namorada, por ser minha referência de tantas maneiras e estar sempre presente na minha vida de uma forma indispensável, mesmo separados por quilômetros.

Aos meus amigos e colegas de curso pela amizade proporcionada durante a faculdade, o que tornou essa trajetória muito mais agradável.

A todos do LS&TC que sempre estiveram dispostos a me ajudar na realização deste trabalho.

PAGNUSSAT, E. **Avaliação Térmica e Microestrutural de Juntas de Filete com Chapas de Diferentes Espessuras**. 2013. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

RESUMO

A qualidade das juntas soldadas é fortemente influenciada pela espessura das chapas unidas e pela condição térmica a que estas são submetidas durante o processo. Este trabalho tem como objetivo avaliar a distribuição de calor em juntas tipo filete com chapas de espessuras diversas, além de analisar os efeitos microestruturais decorrentes de tratamentos térmicos. Para o estudo foi realizada a soldagem MAG robotizada em juntas de filete, em “T”, de aço SAE 1045 e o consumível utilizado foi o arame maciço AWS ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro. O gás de proteção consistiu em uma mistura de Ar+10%CO₂. Do mesmo modo, utilizou-se uma combinação de parâmetros de soldagem para a primeira análise, referente aos tratamentos térmicos, e outra combinação para as juntas de chapas de espessuras variadas, nas quais foram analisados os ciclos térmicos e as macrografias. Foram soldados dois cordões, um em cada lado da alma, de forma sequencial, aproveitando a própria energia do processo para modificar a microestrutura da junta. O cordão que passou pelo pós-aquecimento apresentou refino de grãos em sua microestrutura e o pré-aquecido exibiu modificações nos microconstituintes do metal fundido e da ZAC, sendo que em ambos foi observada dureza semelhante ao metal base. Para a soldagem de chapas de espessuras variadas foi verificado que a chapa de maior espessura busca dar equilíbrio térmico, para a junta, próximo ao cordão. Também, quando soldadas chapas de mesmas espessuras, as juntas mais espessas apresentaram resfriamento mais rápido, quando comparadas com as uniões de materiais mais finos.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamentos térmicos, espessuras variadas, ciclos térmicos.

PAGNUSSAT, E. **Thermal Evaluation and Microstructural of Fillet Joints with Different Plate Thicknesses**. 2013. 28 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

ABSTRACT

The quality of the welded joints is strongly influenced by the thickness of the plates being united and the thermal conditions they are subjected during the process. The main aim of this work was to evaluate the heat distribution in fillet joints composed by different plates thicknesses and to analyze the microstructural effects resulting from thermal treatments. In the present study, robotic MAG process was used to perform fillet joints in "T" configuration. The base metal was SAE 1045 steel and the consumable was solid wire AWS ER 70S-6 with 1.2 mm diameter. The shielding gas was a mixture of Ar +10% CO₂. A combination of welding parameters was used for the first analysis, referring to thermal treatments, and another combination for the joints of plates of various thicknesses, in which the thermal cycles and macrographs analysis. Two welding beads were deposited, one on each side of the web, sequentially, using the actual energy of the process to modify the microstructure of the joint. The bead that was submitted to post-heating presented grain refinement in their microstructure and the preheating modified the microconstituents at the molten metal and the ZAC, and in both the hardness observed was similar to the base metal. In the welding of plates of different thicknesses was observed the supremacy imposed by the thicker plate. Also, when welding plates of the same thickness, the thicker joints showed more rapid cooling compared with the unions of thinner materials.

KEYWORDS: Heat treatments, varying thickness, thermal cycles.

LISTA DE SÍMBOLOS

GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
SAE	Society of Automotive Engineers
CP	Corpo de prova
MF	Metal fundido
ZAC	Zona afetada pelo calor
MB	Metal base
MBF	Metal base fundido
E	Energia de soldagem [J/mm]
V	Tensão no arco [V]
I	Corrente de soldagem [A]
V	Velocidade de soldagem [mm/s]
T_p	Temperatura de pico [°C]
Δ_t	Intervalo de tempo [s]
T_1	Temperatura inicial [°C]
T_2	Temperatura final [°C]
D	Diluição [%]
A	Área de metal de adição fundido [mm ²]
B	Área de metal base fundido [mm ²]
η	Eficiência térmica do processo [%]
t	Garganta [mm]
S_1	Perna na alma [mm]
S_2	Perna na aba [mm]
s	Tamanho [mm]
P_1	Penetração na alma [mm]
P_2	Penetração na aba [mm]

Índice	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1 Processo de soldagem MIG/MAG	2
3.2 Variáveis do processo MIG/MAG	2
3.2.1 Intensidade da corrente de soldagem	2
3.2.2 Tensão de soldagem.....	2
3.2.3 Velocidade de soldagem.....	2
3.3 Geometria e nomenclatura dos cordões de filete	3
3.4 Metalurgia da soldagem.....	3
3.4.1 Energia de soldagem	3
3.4.2 Ciclos térmicos.....	4
3.4.3 Descontinuidades das juntas soldadas	4
3.4.4 Tratamentos térmicos	5
3.4.4.1 Pré-aquecimento.....	5
3.4.4.2 Pós-aquecimento	5
4 METODOLOGIA.....	5
4.1 Materiais e métodos para a soldagem	6
4.2 Materiais e métodos para aquisição de dados	7
4.3 Materiais e métodos para análise metalográfica	7
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	8
5.1 Análise do tipo A.....	8
5.1.1 Macrografia dos cordões.....	8
5.1.2 Micrografias dos cordões	10
5.2 Análise do tipo B.....	11
5.2.1 Macrografia dos cordões.....	12
5.2.2 Ciclos térmicos.....	12
6 CONCLUSÕES	15
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE.....	16
Apêndice I – Posicionamento dos termopares.....	16
Apêndice II – Microestruturas dos cordões.....	16

Figuras

Figura 3.1: Principais características geométricas da junta soldada de filete.....	3
Figura 3.2: Ciclo térmico de soldagem (esquemático) [FIGUEIREDO, 2005].	4
Figura 4.1: Representação dimensional da junta soldada.	6
Figura 4.2: Impressões de microdureza Vickers.....	8
Figura 5.1: Identificação das amostras tipo A.	8
Figura 5.2: Macrografia da análise tipo A.	9
Figura 5.3: Micrografia da região de transição MF-ZAC (50X).....	10
Figura 5.4: Mapeamento da dureza (HV).	11
Figura 5.5: Identificação das amostras tipo B.	11
Figura 5.6: Macrografia da análise tipo B.	12
Figura 5.7: Ciclos térmicos das juntas 2B e 4B (alma).....	13
Figura 5.8: Ciclo térmico para as chapas de diferentes espessuras.	13
Figura 5.9: Ciclo térmico para as chapas de mesma espessura.....	14
Figura 5.10: Ciclo térmico na alma das juntas.	14
Figura 5.11: Ciclo térmico na superfície inferior das chapas.....	14

Tabelas

Tabela 4.1: Composição química do material base (%).	6
Tabela 4.2: Composição química do arame.	6
Tabela 4.3: Juntas e parâmetros empregados.	7
Tabela 5.1: Parâmetros geométricos medidos (juntas tipo A).....	9
Tabela 5.2: Parâmetros geométricos das juntas tipo B.....	12

1. INTRODUÇÃO

Até a década de 1880 a soldagem era pouco utilizada, conhecida, apenas, no formato de forjamento. Com o advento da industrialização e das duas guerras mundiais o processo de soldagem teve grande desenvolvimento e modernização. Assim, a união de materiais, como se conhece atualmente, obteve grandes avanços somente nos últimos 60 anos.

A soldagem é um processo de união de materiais que se destaca devido, principalmente, ao seu largo emprego e grande volume de atividades envolvidas. Nesse caso, ela é realizada através da fusão dos materiais em íntimo contato (com ou sem adição de outro material fundido) ou, simplesmente, pelo contato destes materiais, nas fases sólidas ou semi-sólidas. Os metais e suas ligas lideram a aplicação da soldagem, devendo-se esse fato a sua versatilidade e economia, além das excelentes propriedades mecânicas que as uniões assim obtidas apresentam [MACHADO, 1996].

Dentre as técnicas empregadas para soldar materiais está o processo MIG/MAG (MIG – *Metal Inert Gas* e MAG – *Metal Active Gas*), sendo a sigla em inglês GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). Ele é caracterizado pela formação do arco elétrico entre a peça e o eletrodo nu, sendo este consumível e continuamente alimentado. A poça de fusão formada é protegida por um gás, ou mistura de gases, inerte (MIG) ou oxidante (MAG), razão da diferenciação da nomenclatura. Em 1951, já se apresentavam alguns testes com oxigênio adicionado ao argônio na soldagem de aços. Em 1953, foi possível realizar a solda MAG com dióxido de carbono puro ou em mistura com argônio. Esse processo permite a automação e, conseqüentemente, facilita a necessidade atual de robotizar os processos fabris. Além disso, ele permite facilidade de operação, maior produtividade, pouca escória no cordão, baixo custo de produção, solda executada em todas as posições, cordão com bom acabamento e soldas com excelente qualidade mecânica quando efetuadas com os parâmetros adequados [MACHADO, 1996].

Para realizar a união é necessário aquecer os materiais até uma temperatura adequada. Na soldagem por fusão trabalha-se com fontes de calor de elevada temperatura, concentradas e, portanto, de elevada intensidade. Esta transferência de calor da fonte para a junta causa alterações de temperatura na solda e nas regiões adjacentes do metal base e, conseqüentemente, essas variações causam, além da fusão e solidificação do cordão de solda, variações dimensionais e alterações microestruturais localizadas, que podem resultar em efeitos indesejáveis. A variação de temperatura durante a soldagem em um ponto da peça é descrita pelo seu ciclo térmico de soldagem. Cada ponto é submetido a um ciclo térmico particular que depende, entre outros fatores, da localização deste ponto em relação à solda. Entre os principais parâmetros que descrevem o ciclo térmico está a espessura da junta. Para uma mesma condição de soldagem, uma junta de maior espessura permite um escoamento mais fácil do calor por condução. Assim, quanto mais espessa a junta, mais rapidamente esta tenderá a se resfriar durante a soldagem e, conseqüentemente, a qualidade microestrutural é diminuída. Desta forma, deve-se obter uma microestrutura que não fragilize a junta durante a aplicação [VILCHEZ, 2005].

Neste trabalho será utilizado o aço SAE 1045, que apresenta ótima resistência, tenacidade e relativa ductilidade. No entanto, devido ao alto percentual de carbono ele torna-se temperável, produzindo martensita quando austenitizado e resfriado rapidamente, sendo necessários tratamentos térmicos antes ou após a soldagem.

2. OBJETIVOS

Este trabalho foi proposto com o objetivo de estudar as dificuldades referentes à aplicação do processo e da garantia da qualidade da junta para a união de chapas de diferentes espessuras e para demonstrar a importância dos tratamentos térmicos na soldagem de aços com teor de carbono significativo. Pensando nisso, será realizada a avaliação do ciclo térmico, perfil geométrico, microestrutura formada, bem como estudos sobre condições que favoreçam a produção deste tipo de junta, entre elas está a utilização de condições térmicas diferenciadas impostas à microestrutura. Para tal investigação, serão realizadas juntas do tipo filete, em "T", de aço SAE 1045, e empregado o processo de soldagem MAG com um sistema automatizado. Durante o trabalho experimental serão instalados termopares próximos à junção, com o intuito de capturar a curva de resfriamento das chapas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Processo de soldagem MIG/MAG

Na soldagem ao arco elétrico com gás de proteção, também conhecida como MIG/MAG, um arco entre o metal da base e o metal de adição (arame alimentado continuamente) é aberto e mantido durante o processo. A poça de fusão formada é protegida por um gás, ou mistura de gases, inerte ou oxidante. O processo de soldagem MIG/MAG proporciona muitas vantagens, entre elas: o processo pode ser executado em todas as posições, alta taxa de deposição do metal de solda, altas velocidades de soldagem, menos distorção das peças, ampla faixa de aplicação em diferentes ligas e espessuras [ALVES, 2009; ESAB, 2005].

3.2. Variáveis do processo MIG/MAG

O conhecimento e controle das variáveis do processo são essenciais para a obtenção de cordões de solda de qualidade satisfatória.

3.2.1. Intensidade da corrente de soldagem

A corrente é o parâmetro que possui grande influência sobre a taxa de deposição, modo de transferência, penetração e reforço. A taxa de fusão varia quase linearmente com esse parâmetro. Acrescendo a velocidade de alimentação do arame, com os demais parâmetros constantes, mais corrente é fornecida pela fonte, aumentando a taxa de deposição, a penetração e o tamanho dos cordões de solda, e vice-versa [MACHADO, 1996; ALVES, 2009].

3.2.2. Tensão de soldagem

A tensão tem forte influência sobre a largura do cordão e no modo de transferência do metal. Para fontes com curva característica e tensão constante ela é regulada na máquina, já para fontes do tipo corrente constante, a tensão depende diretamente do comprimento do arco. Se a tensão empregada for muito baixa os efeitos de porosidade, sobreposição, cordão estreito e convexo podem aparecer. Já, se for utilizado um aumento excessivo deste parâmetro, faz-se com que o arco aumente proporcionalmente, causando porosidade, salpico e mordedura [MACHADO, 1996].

3.2.3. Velocidade de soldagem

Velocidade de soldagem é a taxa linear na qual a tocha se movimenta ao longo da junta, assim, torna-se um fator de produtividade. Para um aumento da velocidade, mantido os

demais parâmetros constantes, tem-se menor distorção, ZAC mais estreita, maior refino dos grãos do metal de solda e diminuição das dimensões do cordão. No entanto, um aumento excessivo pode causar defeitos no cordão, como mordedura e trincas de solidificação [MACHADO, 1996; ALVES, 2009].

3.3. Geometria e nomenclatura dos cordões de filete

Uma representação de junta de filete, em "T", com ângulo de 90° entre as faces de fusão, composta por "aba" e "alma", está apresentada na figura 3.1. Nela, também, encontram-se algumas dimensões importantes da solda de filete: garganta (t), menor distância entre a raiz da junta e a face da solda, sendo esta face a hipotenusa do maior triângulo retângulo isósceles que pode ser inscrito na seção transversal do cordão de solda; pernas (S_1 e S_2), dadas pelo metal de solda que funde as laterais da junta, podendo ser iguais; tamanho (s), é o cateto do triângulo retângulo isósceles; penetração (P_1 e P_2), é a distância da superfície onde ocorre fusão [MACHADO, 1996].

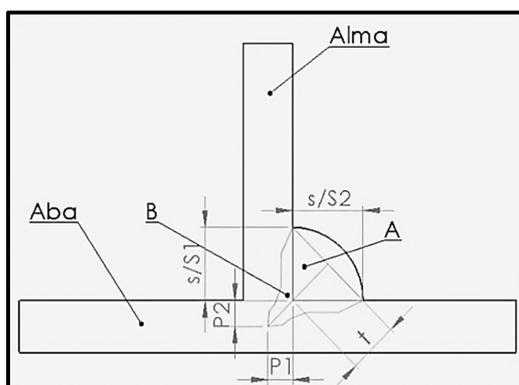


Figura 3.1: Principais características geométricas da junta soldada de filete.

Um parâmetro importante desse tipo de junta é a diluição (D), a qual indica a participação do metal de base na constituição da zona fundida. Ela pode ser calculada pela equação 3.1.

$$D = \frac{B}{A+B} 100 \quad (3.1)$$

Onde A é a área do metal de adição fundido (mm^2) e B é a área do metal base fundido (mm^2), conforme figura 3.1.

3.4. Metalurgia da soldagem

3.4.1. Energia de soldagem

A maioria dos processos de soldagem por fusão são caracterizados pela energia concentrada, temperaturas elevadas, altos gradientes térmicos, variações bruscas de temperatura e, conseqüentemente, extensas variações de microestrutura e propriedades do material [FIGUEIREDO, 2005].

Em condições práticas, a intensidade de uma fonte de calor em soldagem não pode ser facilmente medida. Um parâmetro alternativo, de uso mais comum, é a energia de soldagem, (E), que é a quantidade de energia gerada pela fonte de calor por unidade de comprimento da junta [MODENESI et al., 2012].

$$E = \frac{\eta VI}{v} \quad (3.2)$$

Onde V é a tensão no arco (V), I é a corrente de soldagem (A), v é a velocidade de soldagem (mm/s) e η é a eficiência térmica do processo (%).

Segundo Modenesi et al, 2012, a quantidade de energia por comprimento de solda que não foi transferida para a peça, e representa as perdas do processo, é dada pela eficiência térmica do processo. Este valor depende do processo e das condições de soldagem. Para o processo MIG/MAG o rendimento, que representa a quantidade de energia efetivamente transferida, fica na faixa de 75% a 95%.

3.4.2. Ciclos térmicos

Considerando um ponto qualquer da junta soldada, define-se ciclo térmico como a curva que relaciona a variação da temperatura deste ponto, durante a soldagem e posterior resfriamento, com passar do tempo [ABREU, 2008].

O ciclo térmico de soldagem tem como importantes características a temperatura de pico T_p e a taxa de resfriamento. Sendo, T_p a temperatura máxima atingida no ponto, que diminui com a distância ao centro da solda. Já a taxa de resfriamento é definida pela variação da temperatura, de T_1 a outra T_2 , em um intervalo de tempo (Δt), a qual é uma quantidade escalar e convencionalmente negativa. A figura 3.2 mostra de forma esquemática as características e o formato do ciclo térmico para juntas soldadas [MACHADO, 2000; FIGUEIREDO, 2005].

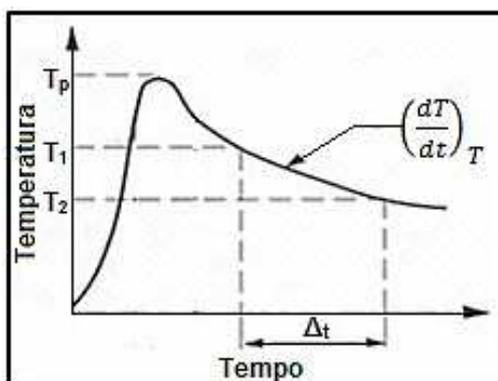


Figura 3.2: Ciclo térmico de soldagem (esquemático) [FIGUEIREDO, 2005].

Para Figueiredo, 2005, os ciclos térmicos de soldagem dependem de diversas variáveis, entre elas: tipo de metal de base (quanto maior a condutividade térmica do material, maior a velocidade de resfriamento), geometria da junta (juntas em T tendem a esfriar mais rapidamente), espessura da junta (até uma espessura limite, a velocidade de resfriamento aumenta com a espessura da peça, acima deste limite, a velocidade de resfriamento independe da espessura), energia de soldagem e temperatura inicial da peça (a velocidade de resfriamento diminui com o aumento destes dois parâmetros).

3.4.3. Descontinuidades das juntas soldadas

As descontinuidades são defeitos ocasionados, na maioria das vezes, pela prática inadequada do processo de soldagem, que podem estar condicionados a inúmeros fatores. Neste capítulo serão discutidos os tipos e as causas destas imperfeições.

As porosidades são originadas no metal de solda em função do aprisionamento de gases ou vapores dissolvidos na poça de fusão durante o processo de solidificação. Este aprisionamento resulta da composição química do metal base, composição química do gás de proteção, comprimento do arco, instabilidade na coluna do arco provocado pela utilização de parâmetros inadequados de soldagem (corrente e tensão fora da faixa especificada, fluxo de

gás fora do especificado), limpeza da região a ser soldada e grau de restrição aliado à contração na mudança de estado da poça de fusão [BARRA e PEREIRA, 1999].

Segundo Alves, 2009, trincas podem surgir no metal depositado ou na ZAC e servem como concentradores de tensão. O alto percentual de carbono aumenta a dureza e contribui para o surgimento de trincas. Altas taxas de resfriamento, alto grau de restrição da junta, perfil impróprio do cordão, absorção de hidrogênio e contaminantes também tornam a junta suscetível às trincas.

Mordeduras são descontinuidades em forma de depressão, gerando um entalhe no pé do cordão, isto é, entre o metal de base e o cordão de solda. Este defeito está ligado à elevada corrente, velocidade de soldagem alta e ao comprimento do arco excessivo. São gerados quando o metal de adição não for suficiente para encher a cavidade até o nível em que o metal de base fundiu [BARRA e PEREIRA, 1999].

A falta de fusão refere-se à ausência de união por fusão entre a solda e o metal base, sendo resultado do aquecimento não adequado do metal que está presente na junta soldada, que pode estar relacionada à limpeza insuficiente dos bordos da junta (deixando óxidos, tintas e óleos), instabilidade do arco ou energia de soldagem muito baixa [BARRA e PEREIRA, 1999].

3.4.4. Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos modificam em maior ou menor grau as estruturas dos aços alterando suas propriedades, por isso, muitas vezes, são indispensáveis.

3.4.4.1. Pré-aquecimento

Os metais em sua maioria são bons condutores de calor. Em consequência disso resfriam a taxas relativamente altas, o que pode contribuir para a formação de microestruturas indesejáveis na região de soldagem. O pré-aquecimento da junta a ser soldada é uma maneira de reduzir a taxa de resfriamento do metal. A temperatura de pré-aquecimento mais aplicada está na faixa de 150 °C a 200 °C [ESAB, 2004].

Segundo ESAB, 2004, durante a soldagem de aços de alto carbono existe o perigo de que o depósito de solda e a ZAC contenham altos percentuais de martensita. Tais soldas possuem alta dureza e baixa ductilidade e podem vir a trincar durante o resfriamento. O pré-aquecimento age diminuindo o gradiente de temperatura entre as massas quentes e frias, em consequência disso, faz com que a zona de soldagem aquecida resfrie-se mais lentamente.

3.4.4.2. Pós-aquecimento

O pós-aquecimento significa o aquecimento da junta soldada imediatamente após a solda ter sido realizada. O pós-aquecimento tem a mesma função do pré-aquecimento, ou seja, mantém a temperatura da peça em um nível suficientemente elevado de tal maneira que a junta soldada resfrie lentamente. Assim como no pré-aquecimento, o resultado é uma ductilidade maior na região da solda, por isso é mais frequente em aços altamente temperáveis [ESAB, 2004].

4. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia utilizada para a análise das juntas soldadas.

Os procedimentos práticos foram realizados no Laboratório de Soldagens e Técnicas Conexas (LS&TC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Para tais experimentos, foram realizadas uniões de chapas de diferentes espessuras (menor espessura na alma), assim como de mesmas espessuras (aba e alma) para servirem de parâmetros de

comparação. Todos os cordões foram feitos na forma de junta de filete em “T”, conforme a figura 4.1, posição horizontal, com a tocha posicionada em um ângulo de aproximadamente 45° entre as duas chapas.

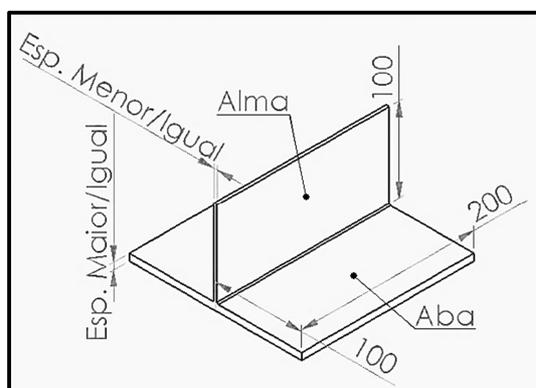


Figura 4.1: Representação dimensional da junta soldada.

4.1. Materiais e métodos para a soldagem

Como material dos corpos de prova foram utilizadas chapas de aço SAE 1045, médio carbono, com espessuras de 3,75 mm, 8,00 mm, 9,50 mm e 12,50 mm. Como visto na figura 4.1, a aba tem dimensões de 200 mm x 200 mm e a alma de 200 mm x 100 mm. A composição química referente a cada chapa foi retirada dos certificados de qualidade emitidos pelos fornecedores do material, e pode ser vista na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Composição química do material base (%).

Chapa	Espessura (mm)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)				
		C	Mn	P	S	Si
1	3,75	0,5000	0,6400	0,0200	0,0028	0,2060
2	8,00	0,4600	0,6900	0,0230	0,0050	0,2000
3	9,50	0,4800	0,7200	0,0200	0,0050	0,2100
4	12,50	0,4700	0,8400	0,0250	0,0110	0,2070

O equipamento utilizado para a soldagem foi o Robô Yaskawa Motoman, modelo MA 1400, com seis graus de liberdade. A fonte de potência é da marca Fronius Trans Puls, com saída máxima de corrente de 400 A.

O consumível utilizado foi o arame maciço AWS ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro, conforme descrições da tabela 4.2. O gás de proteção foi uma mistura de Ar+10%CO₂.

Tabela 4.2: Composição química do arame.

Material	COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)					
	C	Si	Mn	P	S	Cu
AWS ER70S-6	0,07 - 0,15	0,80 - 1,15	1,40 - 1,85	0,025	0,035	0,50

Durante a soldagem, a aba ficou apoiada em um suporte cerâmico, a fim de evitar maiores trocas térmicas e deixar ambas as chapas com as mesmas condições de resfriamento, ou seja, a extração de calor das chapas por condução foi diminuída. A fixação da alma na aba, antes de depositar o cordão, foi realizada por pontos de solda nas extremidades.

Para a análise do pré e pós-aquecimento (análise designada no decorrer do trabalho como tipo A), foram soldadas chapas de mesma espessura (9,5 mm). Primeiramente foi feito apenas um cordão em um dos lados da alma, para caracterizar a junta sem qualquer tipo de tratamento térmico. Depois, em outro corpo de prova foi realizada a soldagem em ambos os lados, em curto intervalo de tempo, sendo assim, o primeiro cordão passou por processo de

pós-aquecimento durante a soldagem do segundo cordão e o segundo cordão sofreu o processo de pré-aquecimento em função da energia já existente pela soldagem do primeiro cordão. Nestes cordões foi utilizado o modo de operação da fonte manual, no qual a tensão e a corrente de soldagem são ajustadas independentemente.

No estudo referente à extração de calor em chapas de diferentes espessuras (análise designada no decorrer do trabalho como tipo B) e seus efeitos macroestruturais, foram soldados quatro corpos de prova, sendo eles:

- Corpo de prova 1: Esp. Aba=12,50 mm; Esp. Alma=3,75 mm
- Corpo de prova 2: Esp. Aba=12,50 mm; Esp. Alma=12,50 mm
- Corpo de prova 3: Esp. Aba=8,00 mm; Esp. Alma=3,75 mm
- Corpo de prova 4: Esp. Aba=8,00 mm; Esp. Alma=8,00 mm

Na soldagem nos experimentos do tipo B foi utilizado o modo de operação da fonte sinérgico para poder melhorar o cordão soldado. Neste modo, em função do gás de proteção, material da peça e diâmetro de arame empregado, ao definirmos a tensão de soldagem, a fonte estabelece a velocidade de alimentação do arame (ou corrente de soldagem) mais adequada.

As juntas realizadas, assim como os parâmetros de soldagem empregados nos respectivos experimentos, são descritos na tabela 4.3. Estes parâmetros foram obtidos de forma experimental.

Tabela 4.3: Juntas e parâmetros empregados.

PARÂMETROS DE SOLDAGEM						
Tipo de Análise	Corpo de Prova	Espessuras (mm)	Corrente (A)	Tensão (V)	Vel. Soldagem (mm/s)	Energia (J/mm)
TIPO A	1A	9,50X9,50	350	25	7,5	1167
	2A	9,50X9,50				
TIPO B	1B	12,50X3,75	290	25	7,5	967
	2B	12,50X12,50				
	3B	8,00X3,75				
	4B	8,00X8,00				

4.2. Materiais e métodos para aquisição de dados

A aquisição dos valores de temperatura foi realizada com termopares do tipo K e fios de compensação. A colocação dos termopares se deu em pontos de, aproximadamente, 13 mm do cordão. A fixação dos termopares no metal base foi estabelecida pela soldagem utilizando banco de capacitores. A quantidade e posição dos termopares utilizados para cada CP está apresentada no apêndice I. Além disso, o sistema foi constituído da ligação dos termopares a um amplificador, um conversor de sinal e um computador. Para a aquisição foi utilizado o programa AqDados 7.2 da Lynx e o sistema de aquisição ADS2000 da mesma empresa.

Para a análise dos ciclos térmicos foi observado a temperatura de pico e a taxa de resfriamento máxima. A taxa de resfriamento foi calculada para toda a aquisição de temperaturas, com intervalo de tempo de 0,1 s.

4.3. Materiais e métodos para análise metalográfica

Para os corpos de prova do tipo A foi realizada a análise da microestrutura formada após a solda. Foram analisadas as regiões próximas às extremidades de cada cordão, pois os tempos de soldagem são diferentes. As amostras foram lixadas até a lixa de granulometria 600, para ser realizada a macrografia dos cordões, depois embutidas a frio, lixadas na lixa 1200, polidas em um disco de feltro com abrasivo (alumina) e atacadas em nital 2%. Após as amostras estarem atacadas, as microestruturas foram observadas e fotografadas com auxílio de um microscópio óptico. Para confirmar as modificações microestruturais ocorridas foi realizado o mapeamento de dureza. Os dados foram coletados na escala Vickers, utilizando

peso e tempo de penetração de 100 g e 10 s, respectivamente. O passo de cada indentação é de 0,1 mm e com início, no metal fundido, a 1 mm da ZAC. Na figura 4.2 ilustram-se as impressões (mostradas pela seta).

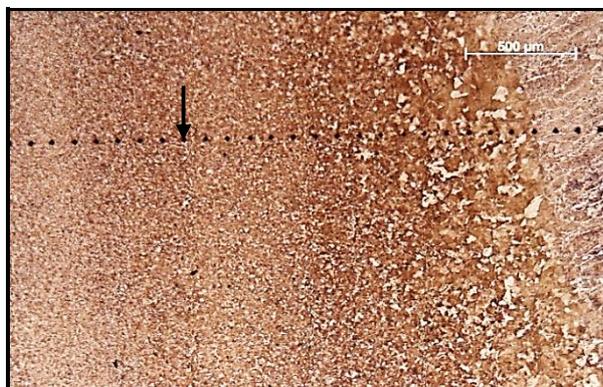


Figura 4.2 : Impressões de microdureza Vickers.

Nas amostras do tipo B, foram realizadas apenas análises macroestruturais, sendo avaliada a medida de penetração (P1 e P2), garganta (t), tamanho (s), perna (S1 e S2), área de metal base fundido, área de metal fundido, diluição e defeitos, conforme figura 3.1. As medidas dos cordões foram obtidas pelo software ImageJ (software para processamento e análise de imagens).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Análise do tipo A

Esta análise tem o objetivo de avaliar as modificações ocorridas nas juntas soldadas, devido à deposição imediata do segundo cordão. A nomenclatura e posicionamento de cada cordão analisado podem ser vistos na figura 5.1. O índice "I" refere-se ao início do cordão e "F" ao final do cordão.

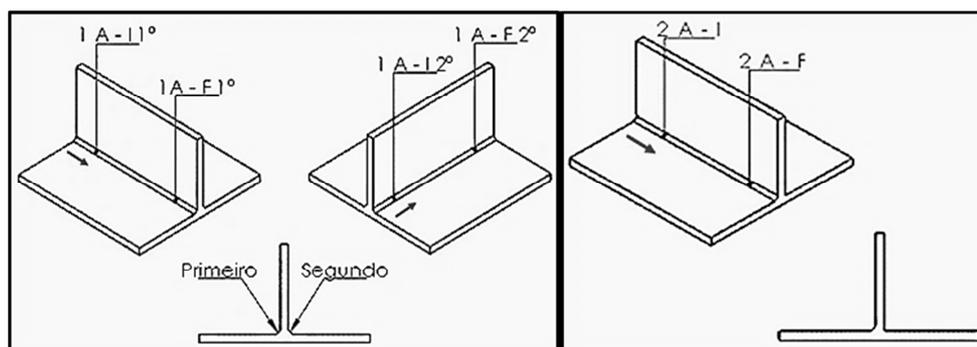


Figura 5.1: Identificação das amostras tipo A.

5.1.1. Macrografia dos cordões

Na figura 5.2 é apresentada a macrografia dos cordões de solda utilizados para caracterização da análise do tipo A.

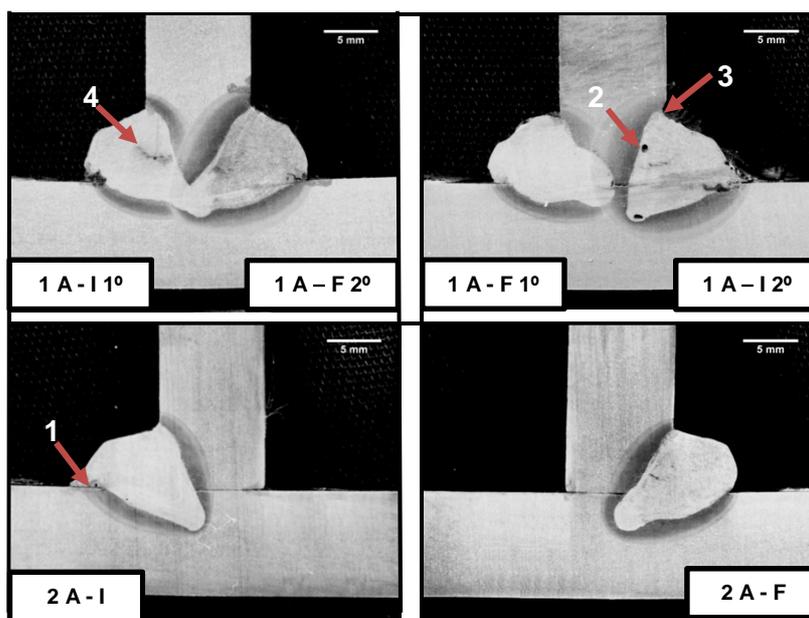


Figura 5.2: Macrografia da análise tipo A.

Os parâmetros geométricos medidos estão indicados na figura 3.1, e seus valores estão apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros geométricos medidos (juntas tipo A).

Cordão	Garganta (t) mm	Penetração 1 (P1) mm	Penetração 2 (P2) mm	Tamanho (s) mm	Perna 1 (S1) mm	Perna 2 (S2) mm	Área Total (A+B) mm ²	Área MBF (B) mm ²	Diluição %
1 A - I 1º	2,99	5,32	2,50	4,23	6,60	4,23	56,49	27,16	48,08
1 A - F 2º	3,23	6,03	3,13	4,58	6,76	4,58	64,29	37,27	57,97
1 A - F 1º	3,32	4,89	1,97	4,70	6,01	4,70	61,70	29,16	47,26
1 A - I 2º	4,00	3,55	3,39	5,67	6,61	5,67	62,68	35,38	56,45
2 A - I	3,61	4,24	3,70	5,11	6,04	5,11	62,54	30,95	49,49
2 A - F	3,57	5,19	3,35	5,05	5,87	5,05	62,12	31,52	50,74

A partir da tabela 5.1 percebe-se maiores áreas de metal base fundido (MBF) e diluição (D) nas amostras referentes ao segundo cordão (1A), além de serem maiores em seu final, com 37,27 mm² de MBF e 57,97% de diluição. Isso é justificado pela energia de pré-aquecimento já existente, devido à soldagem do primeiro cordão, que se soma com a energia de soldagem do segundo cordão e aumenta a energia disponível para fusão do material. Os valores de MBF e diluição para o primeiro cordão são semelhantes aos encontrados para os CP sem influência térmica (2A), pois quando a energia do segundo cordão atingiu o primeiro, o mesmo já havia solidificado, podendo apenas modificar sua microestrutura.

Observando a figura 5.2, também, é possível notar a região termicamente afetada do segundo cordão soldado maior, isso provocado pela redução da taxa de resfriamento.

Além disso, na figura 5.2 estão identificados por setas vermelhas alguns defeitos de soldagem como a falta de fusão (1), porosidade (2), mordedura (3), os quais estão relacionados com o modo de operação da fonte do tipo manual, onde os parâmetros de soldagem, mostrados na tabela 4.3, não formaram uma boa combinação, ocasionando instabilidade do arco e ocorrência de discontinuidades. As trincas (4), presentes em quase todos os cordões, são os defeitos mais observados nesta análise e devem ter sido causadas pelo elevado percentual de carbono do aço, havendo formação de microestruturas frágeis, pelo estado de tensões trativas na região da solda (junta em ângulo) e pelos elementos químicos (hidrogênio) presentes no metal de solda. Mesmo no cordão soldado com pré-aquecimento houve a formação de trincas, provavelmente por a microestrutura formada não resistir ao alto grau de restrição da junta e às tensões ali presentes.

5.1.2. Micrografias dos cordões

O estudo inicial, referente à microestrutura, se deu pela comparação do tamanho de grãos encontrado em cada cordão. A figura 5.3 mostra o tamanho dos grãos da ZAC com aumento de 50x. No apêndice II estão as imagens das microestruturas com maiores detalhes.

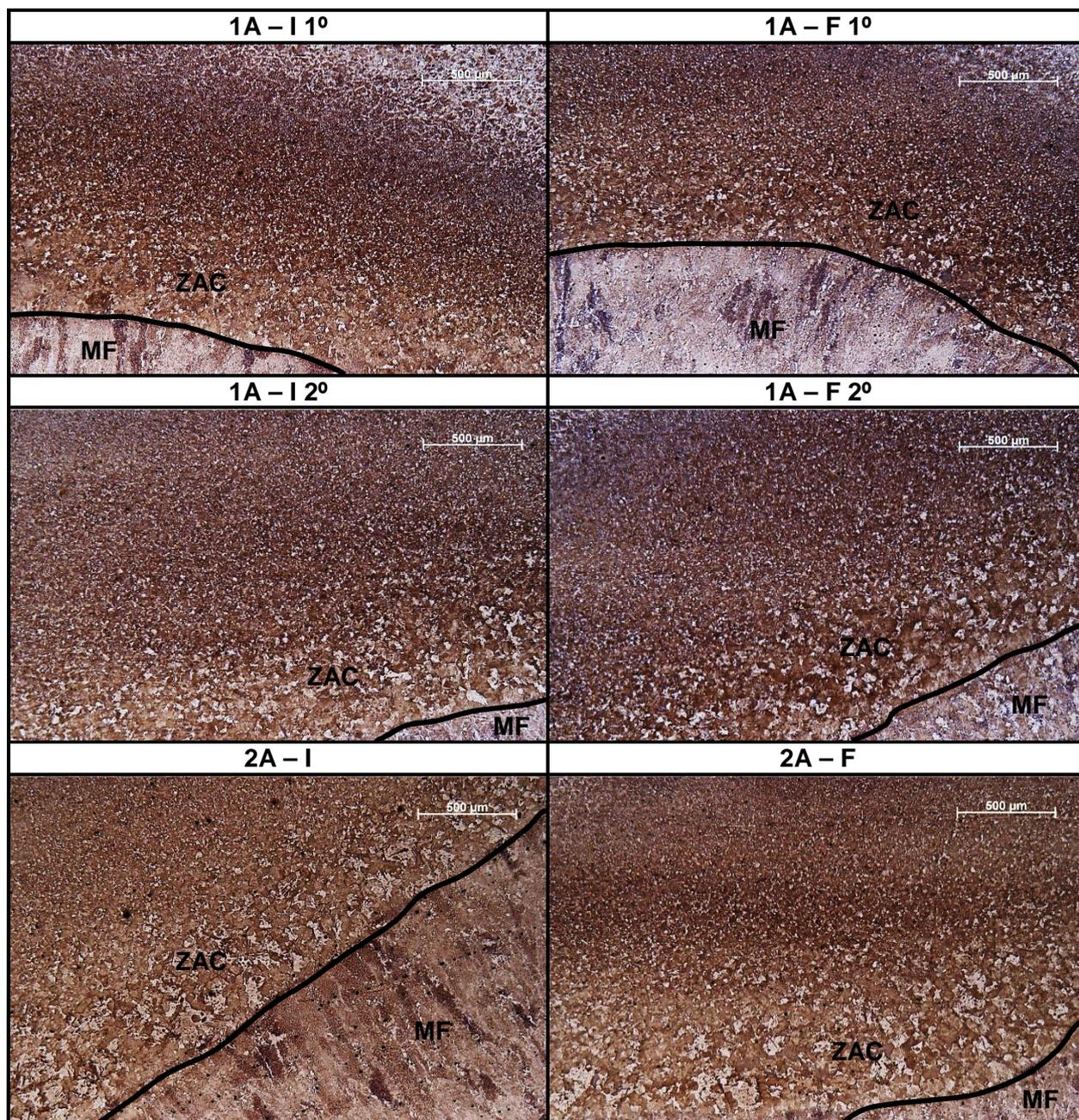


Figura 5.3: Micrografia da região de transição MF-ZAC (50X).

Na figura 5.3 nota-se o refino dos grãos da ZAC dos cordões que sofreram algum tipo de tratamento térmico (1A) com relação aos que foram soldados apenas em um lado da alma (2A). Além disso, o refino maior se deu no primeiro cordão soldado, ou seja, no cordão que foi pós-aquecido. Para comprovar as variações microestruturais realizou-se o mapeamento da dureza e o resultado de cada cordão está apresentado na figura 5.4. A transição metal fundido

(MF) com a ZAC é dada pela linha vermelha e os pontos de transição entre a ZAC e o metal base (MB) são indicados pelas setas.

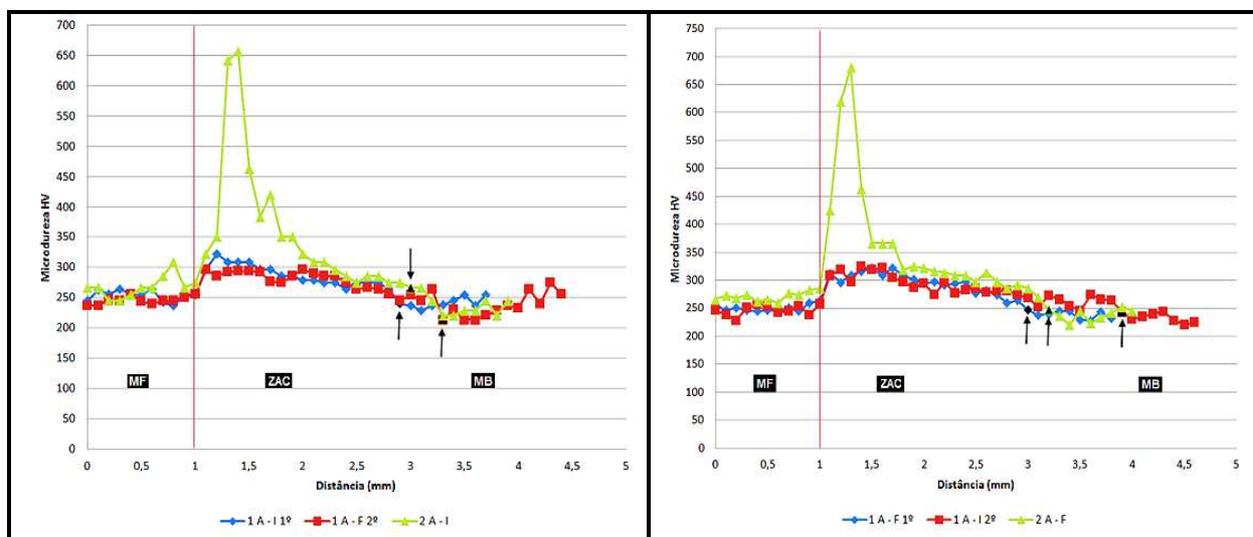


Figura 5.4: Mapeamento da dureza (HV).

Comparando o perfil de microdureza plotado na figura 5.4, observa-se que os cordões da junta que foi soldada nos dois lados da alma, tanto o pré-aquecido quanto o pós-aquecido, posição inicial ou final, apresentaram dureza máxima de 321 HV, bem inferior ao cordão soldado sem qualquer tipo de influência térmica (2A), com máximo de 681 HV. Assim, conclui-se que o calor proveniente da soldagem do segundo cordão, ao atingir a ZAC e o MF do primeiro, provoca o refino e o revenimento da microestrutura, e por isso a dureza tem valores mais próximos do MB (aproximadamente 240 HV). A taxa de resfriamento para o segundo cordão foi menor, em virtude do pré-aquecimento, o que levou ao surgimento de microconstituintes de dureza menor em relação à ZAC da junta 2A e, também, semelhantes ao MB. As durezas nas diferentes posições da junta 1A não apresentaram muitas divergências, sendo um pouco menores para o segundo cordão, especialmente na posição final. Os picos de dureza, observados nas amostras do tipo 2A, são referentes às fases claras na zona de crescimento de grão, vistas na figura 5.3. Assim, conclui-se que a junta 1A apresenta microestrutura menos frágil quando comparada com a junta 2A.

5.2. Análise do tipo B

Esta análise tem o objetivo de avaliar os ciclos térmicos e o perfil geométrico das juntas com chapas de diferentes espessuras. A nomenclatura e o local de onde foi retirada a amostra analisada podem ser vistos na figura 5.5.

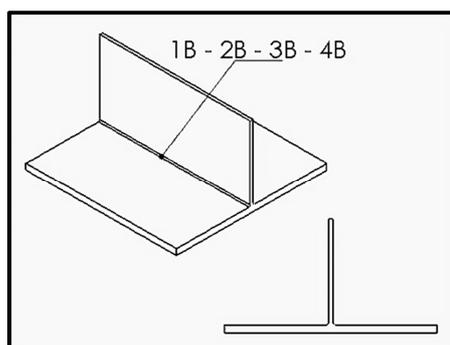


Figura 5.5: Identificação das amostras tipo B.

5.2.1. Macrografia dos cordões

As soldas desta análise precisaram ser refeitas devido a uma falha no sistema de aquisição dos ciclos térmicos. Os cordões estão ilustrados na figura 5.6, sendo que o cordão avaliado está marcado com a seta.

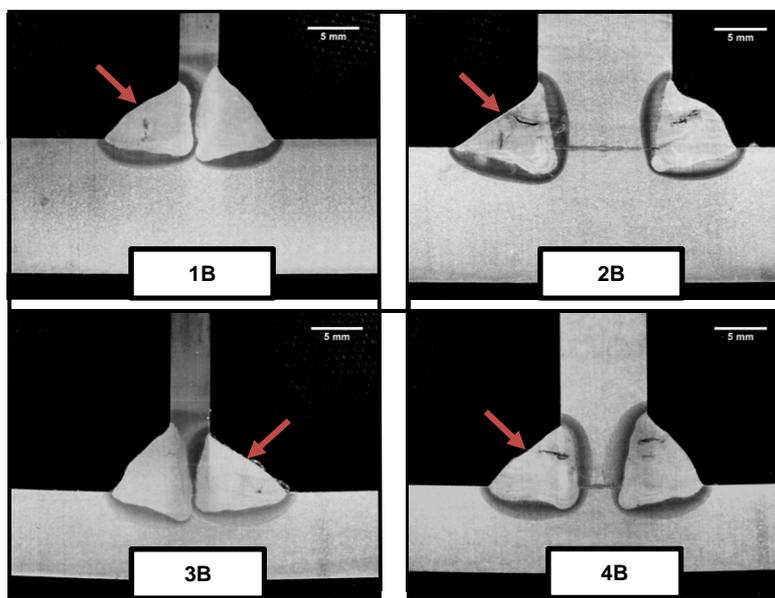


Figura 5.6: Macrografia da análise tipo B.

Assim como na análise anterior (tipo A), para esta avaliação foram medidos os parâmetros geométricos visualizados na figura 3.1. Esses valores estão apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Parâmetros geométricos das juntas tipo B.

Cordão	Garganta (t) mm	Penetração 1 (P1) mm	Penetração 2 (P2) mm	Tamanho (s) mm	Perna 1 (S1) mm	Perna 2 (S2) mm	Área Total (A+B) mm ²	Área MBF (B) mm ²	Diluição %
1B	3,76	1,55	1,65	5,33	5,33	7,05	37,93	16,70	44,03
2B	4,01	1,86	2,45	5,68	6,09	7,80	40,64	19,05	46,88
3B	3,80	1,35	1,85	5,38	5,52	7,41	39,67	18,12	45,68
4B	3,95	1,71	2,18	5,59	5,59	7,29	40,91	19,81	48,42

Conforme a tabela 5.2, os valores de penetração e perna na aba (P_2 e S_2) foram maiores do que os referentes à alma (P_1 e S_1). Isso está ligado ao ângulo de ataque da tocha com inclinação levemente superior a 45° . As juntas realizadas com chapas de mesma espessura tiveram maior área de fusão do metal base e diluição. Por ter sido utilizado o modo de operação da fonte como sinérgico, a quantidade de defeitos, em relação à análise do tipo A, foi menor. Nestes cordões surgiram apenas trincas no MF. Isso foi motivado pelo elevado percentual de carbono do aço, havendo formação de microestruturas frágeis, pelas tensões de tração no cordão, aumentadas pela restrição imposta pela junta em ângulo e pela possível presença de hidrogênio no metal de solda.

5.2.2. Ciclos térmicos

Todos os gráficos apresentados neste subcapítulo foram adquiridos em pontos de aproximadamente 13 mm do cordão. Na figura 5.7 é feita a comparação dos ciclos térmicos entre as juntas soldadas com chapas de mesma espessura, percebendo-se a superioridade da

taxa de resfriamento sofrida pela junta de espessura maior (12,5 mm), com relação à junta de 8 mm. Os valores máximos encontrados foram de $-22,26$ °C/s para a mais espessa e $-12,76$ °C/s para a menos espessa. Os gráficos referem-se aos termopares na alma das juntas.

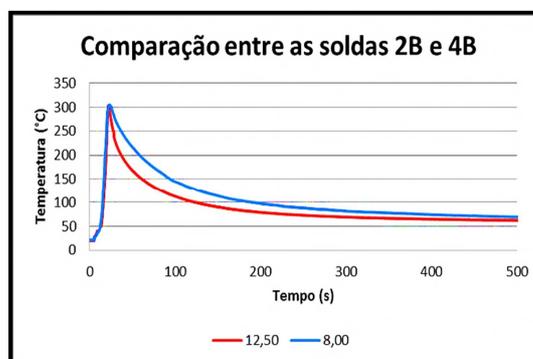


Figura 5.7: Ciclos térmicos das juntas 2B e 4B (alma).

Quando foram soldadas na alma chapas de menor espessura, a temperatura de pico nestas chapas foi superior à apresentada na aba de maior espessura, conforme figura 5.8, onde tem-se que para a junta 1B a T_p na alma foi de $340,88$ °C e na aba de $314,89$ °C. Já para a junta 3B a T_p da alma atingiu $321,90$ °C, enquanto a aba apresentou o máximo em $300,52$ °C. Nesta figura esta demonstrada a comparação dos ciclos térmicos entre pontos das chapas de diferentes espessuras das juntas 1B e 3B.

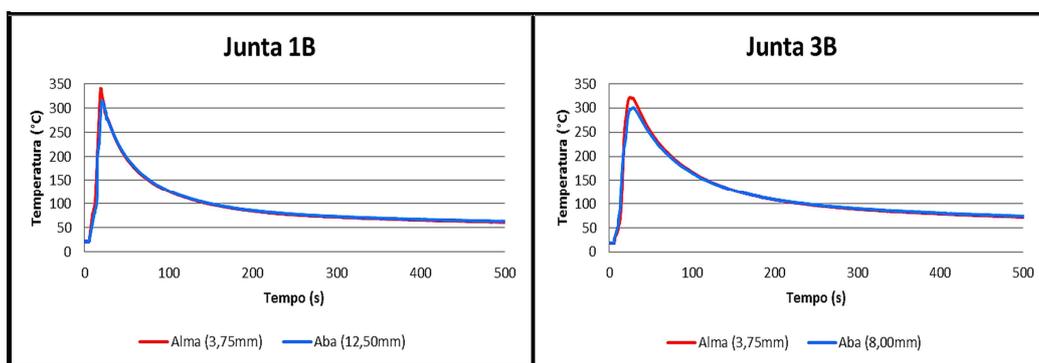


Figura 5.8: Ciclo térmico para as chapas de diferentes espessuras.

A taxa de resfriamento, segundo consta na teoria de Figueiredo 2005, deveria ser maior na chapa de maior espessura. Mas, conforme a figura 5.8, na junta 1B tem-se a taxa de resfriamento maior, logo após a temperatura de pico, para a chapa de menor espessura ($-20,7$ °C/s). A aba apresentou taxa de resfriamento máximo de $-19,2$ °C/s. Da mesma forma, para a junta 3B a taxa de resfriamento máxima foi de $-8,84$ °C/s para a alma e $-6,89$ °C/s para a aba. Porém, logo em seguida as duas chapas tiveram comportamento térmico semelhante. Isso foi ocasionado pelo domínio da temperatura imposto pela aba. Apesar de a chapa menos espessa ter alcançado a T_p maior, ela possivelmente teve a extração de calor facilitada pela aba e logo entrou em equilíbrio com a mesma, a qual comandou o resfriamento da junta. A junta 1B tem as taxas de resfriamento maiores, quando comparadas com a 3B, isso pode ser justificado por possuir mais massa na aba e facilitar a dissipação do calor por condução.

Para as juntas formadas de chapas de mesma espessura a T_p , tanto na alma quanto na aba, foram semelhantes, em torno de 300 °C, conforme a figura 5.9. Na junta 2B a taxa de resfriamento máxima foi de $-22,26$ °C/s para a alma e $-20,66$ °C/s para a aba e na junta 4B a taxa de resfriamento máxima foi de $-12,76$ °C/s para a alma e $-11,25$ °C/s para a aba. Assim, apesar de ser pequena a diferença, o resfriamento mais rápido se deu, novamente, na alma das juntas em virtude da extração de calor provocada pela aba. Com isso, fica comprovado que

a aba mantém amplo domínio térmico sobre a temperatura da alma, para espessuras de alma iguais ou inferiores a aba.

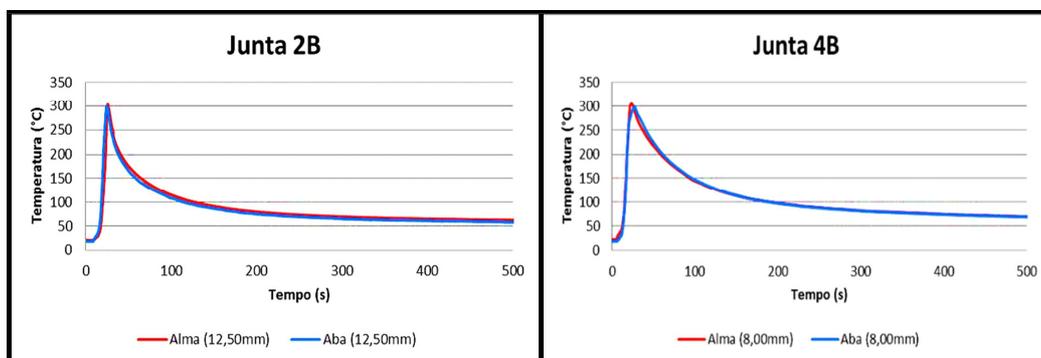


Figura 5.9: Ciclo térmico para as chapas de mesma espessura.

Na figura 5.10 é feita a comparação dos ciclos térmicos na alma de cada junta, e para este caso, a T_p foi maior nas chapas de 3,75 mm de espessuras, porém, o resfriamento foi mais rápido nas almas com espessuras maiores (para mesma aba), sendo que a máxima taxa de resfriamento na alma da junta 1B foi de $-20,70$ °C/s, para a junta 2B $-22,26$ °C/s, para a 3B $-8,84$ °C/s e para a 4B $-12,76$ °C/s. Estes resultados aconteceram, pois, além da extração de calor ocorrer pela aba, também aconteceu proporcionalmente à inércia térmica da alma.

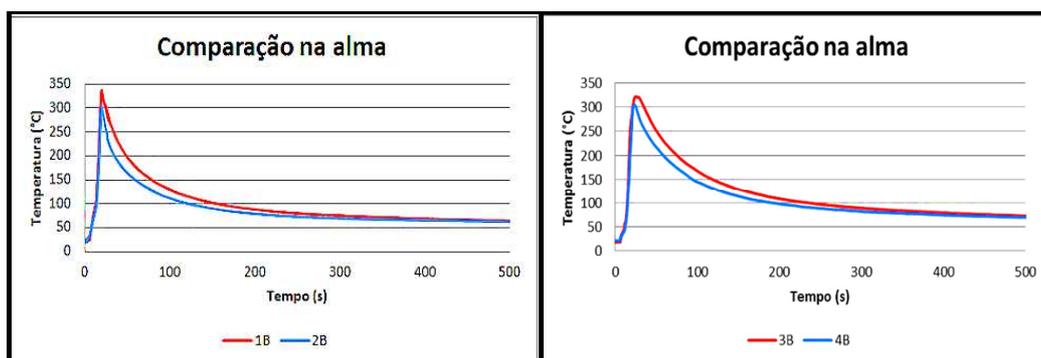


Figura 5.10: Ciclo térmico na alma das juntas.

O ciclo térmico presente na superfície inferior da aba, logo abaixo do cordão, pode ser visto na figura 5.11. A temperatura de pico é maior para a chapa de menor espessura, conforme esperado, uma vez que a energia dissipada pela chapa de espessura maior foi mais intensa e o ponto está localizado mais distante do cordão para a chapa de 12,5 mm de espessura. As taxas de resfriamento máximas foram semelhantes, sendo de $-8,91$ °C/s para a chapa de 8 mm de espessura e $-8,35$ °C/s para a chapa de 12,5 mm.

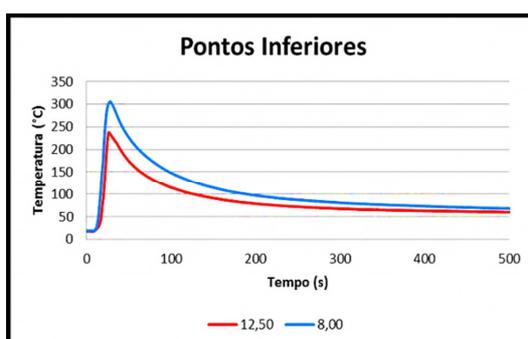


Figura 5.11: Ciclo térmico na superfície inferior das chapas.

6. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste trabalho foram constatados obter resultados experimentais coerentes com a teoria estudada.

Com o estudo ficou comprovada a importância dos tratamentos térmicos para o beneficiamento da microestrutura afetada durante a solda. Na junta em que foram realizados dois cordões em sequência foi comprovado o refino de grãos para o primeiro cordão, o qual passou por processo de revenimento, e, ainda, mudanças dos microconstituintes formados da solidificação do segundo cordão. Esses resultados implicaram em dureza dos cordões próxima ao metal base, o que traz melhores características mecânicas à junta. Assim, pode-se pensar em um cuidadoso planejamento da sequência de soldagem dos cordões para reduzir a dureza da microestrutura e qualificar a junta.

Na avaliação dos ciclos térmicos, variando as espessuras das chapas soldadas, foi possível comprovar que juntas de chapas de espessuras maiores possuem resfriamento mais rápido, quando comparadas com juntas de espessuras menores, isso ocasionado pela maior massa das mesmas. Também foi constatado que a chapa de espessura maior tende a dar equilíbrio térmico para a união, e por mais que a temperatura de pico seja maior na chapa mais fina ela logo atinge a mesma taxa de resfriamento imposta pela chapa de maior inércia. Os defeitos macroscópicos, também, se fizeram presentes nesta análise, principalmente as trincas no MF, o que prova a dificuldade que se tem na soldagem, com qualidade, de aços de médio carbono.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, C. F.; **“Metalurgia da Soldagem”**, CEFET-PA, 2008.

Alves, V. J.; **“ Desenvolvimento de envelopes operacionais para processo MIG/MAG robotizado com diferentes gases de proteção”**, Dissertação (Mestrado), UFRGS, 2009.

Barra, S. R.; Pereira, A. S.; **“Descontinuidades em Soldagem”**, Trabalho de pesquisa, UFSC, Florianópolis, 1999.

ESAB BR; **“Metalurgia da Soldagem”**, Apostila, ESAB, 2004.

ESAB BR; **“Soldagem MIG/MAG”**, Apostila, ESAB, 2005.

Figueiredo, K. M.; **“Tecnologia da Soldagem”**, CEFET, São Luís, 2005.

Machado, I. G.; **“Soldagem e Técnicas Conexas: Processo”**, 1ª edição, Porto Alegre, 1996.

Machado, I.G.; **“Condução de Calor na Soldagem: Fundamentos e Aplicação”**, Imprensa Livre, 2000.

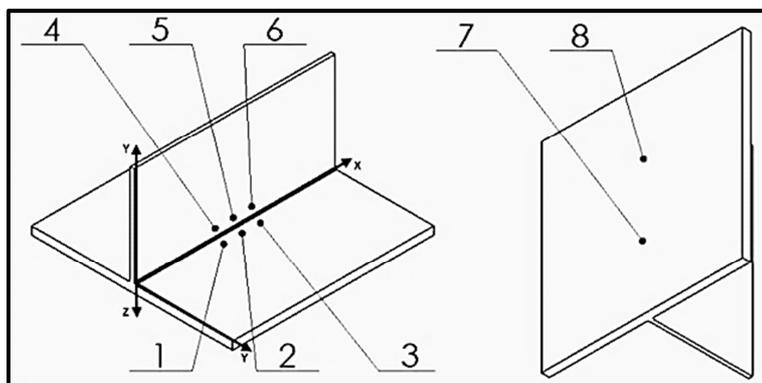
Modenesi, P. J.; Marques, P. V.; Santos, D. B.; **“Introdução à Metalurgia da Soldagem”**, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

Vilchez, C. A. Z.; **“ Influência de Ciclos Térmicos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas do Aço Cos Civil 300”**, Dissertação (Mestrado), UNESP, 2005.

APÊNDICE

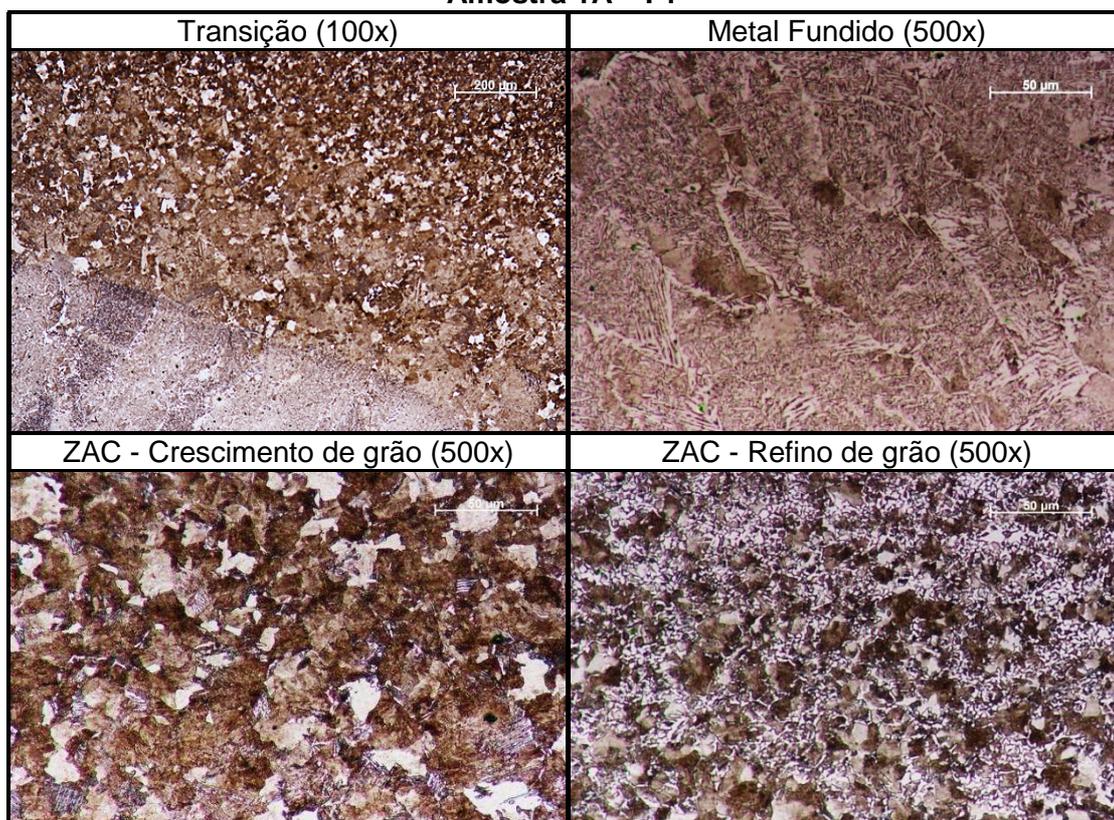
Apêndice I – Posicionamento dos termopares.

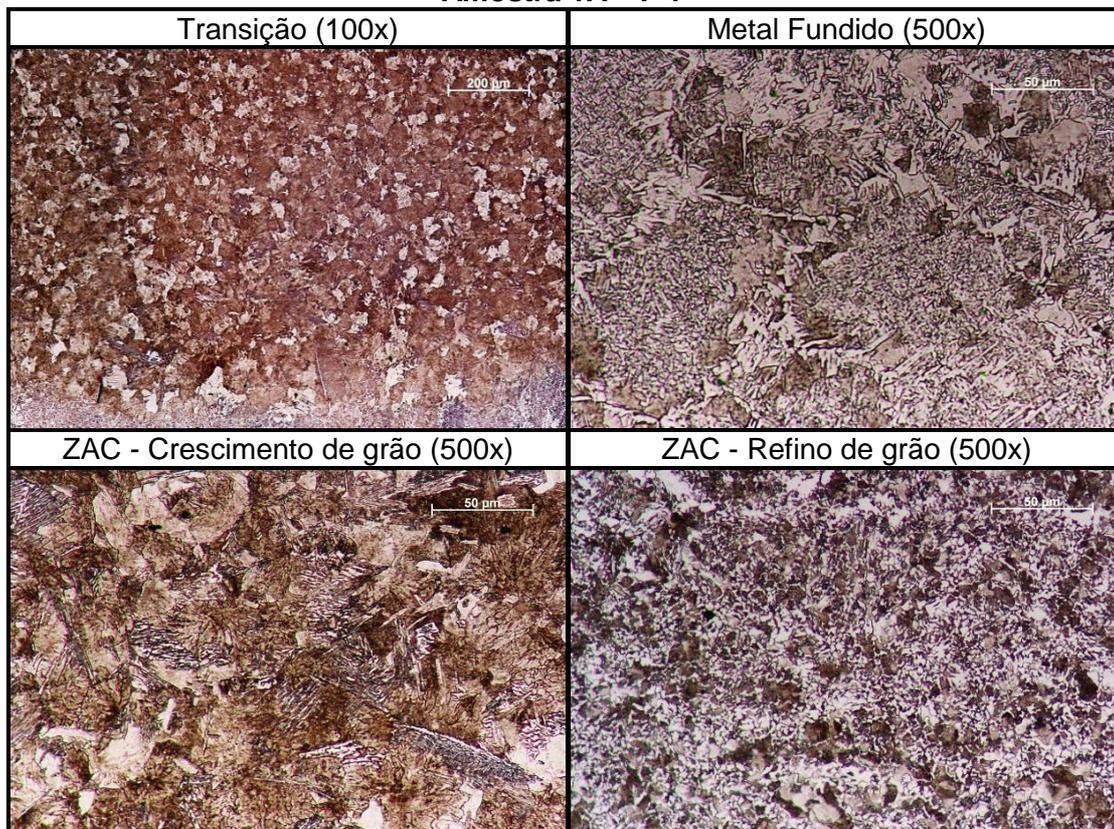
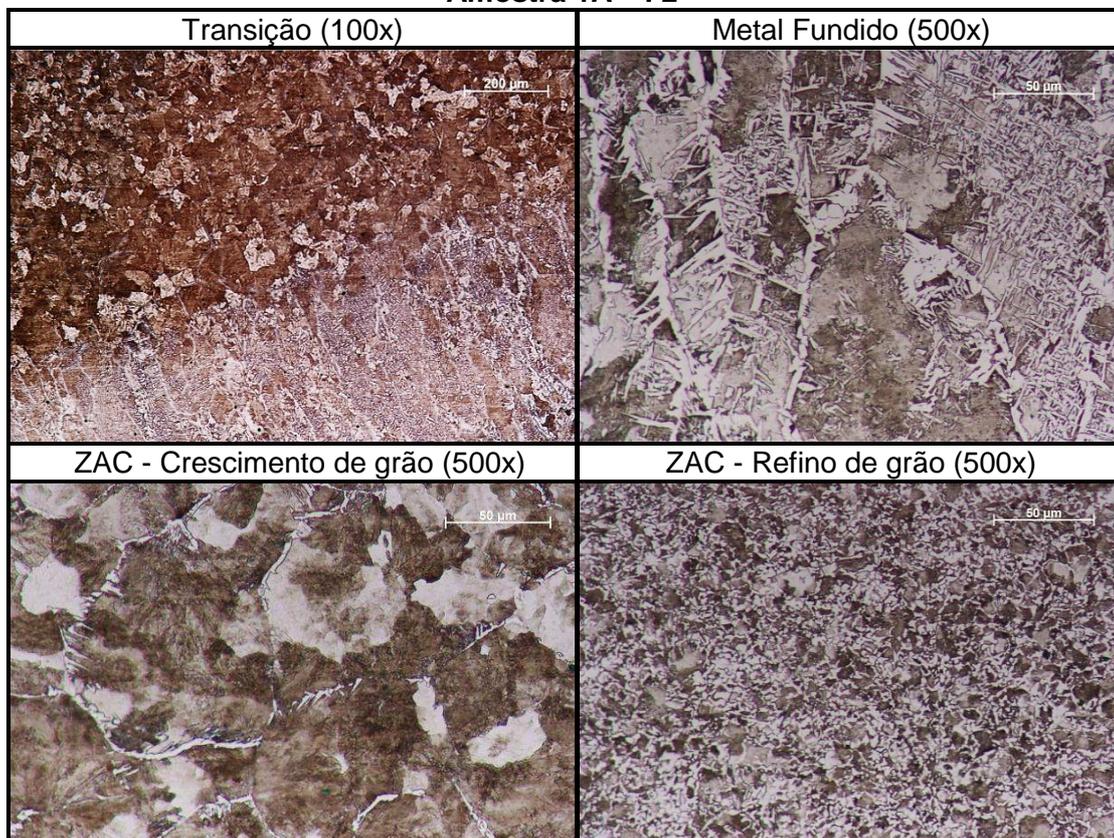
- Representação da soldagem dos termopares

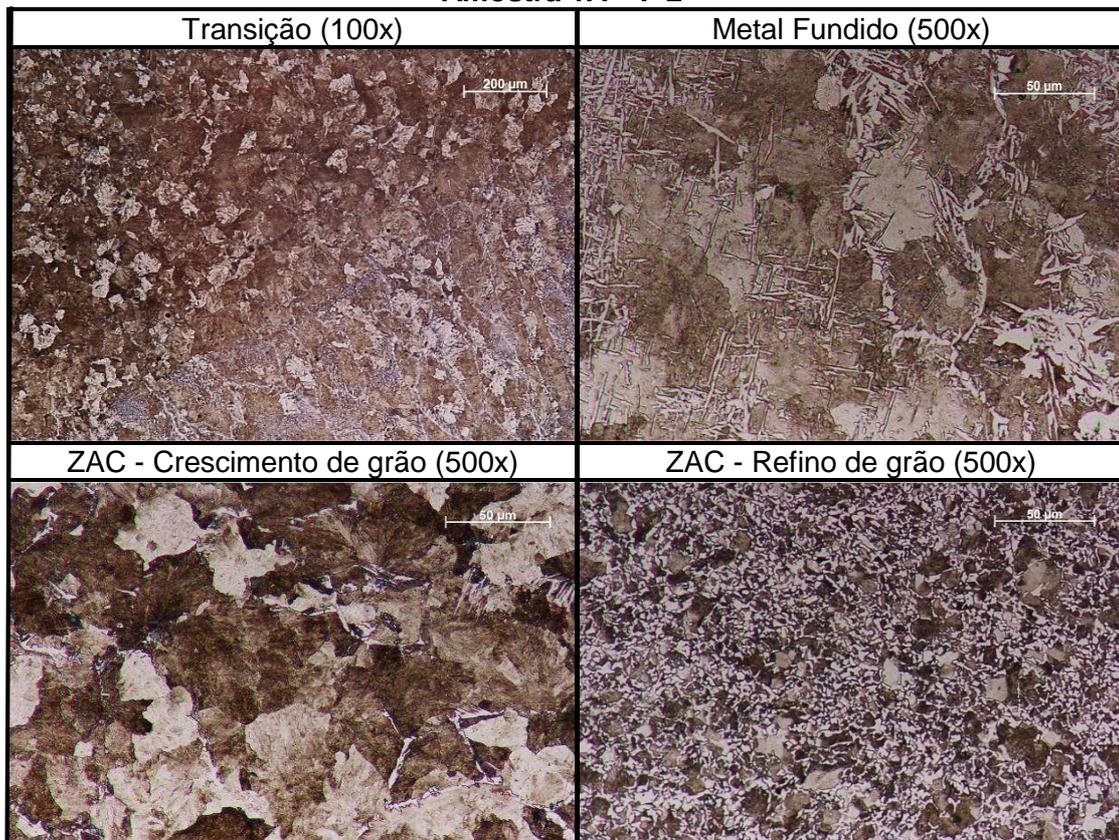
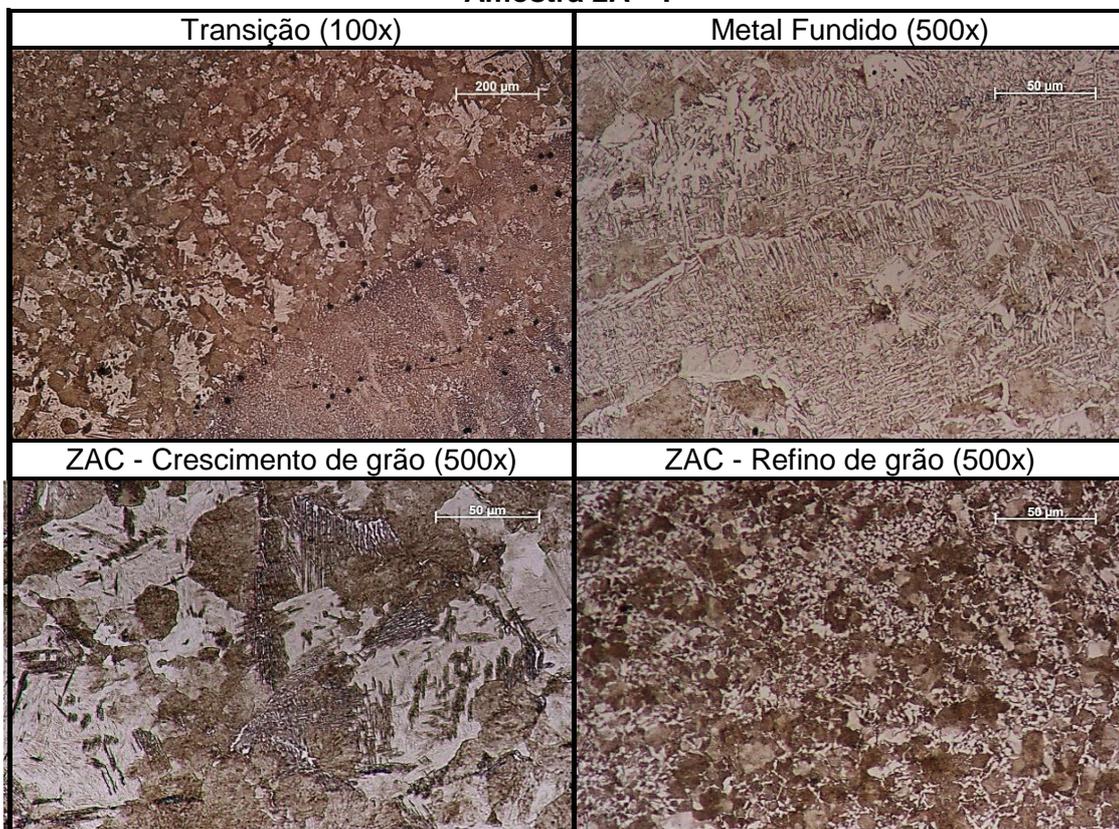


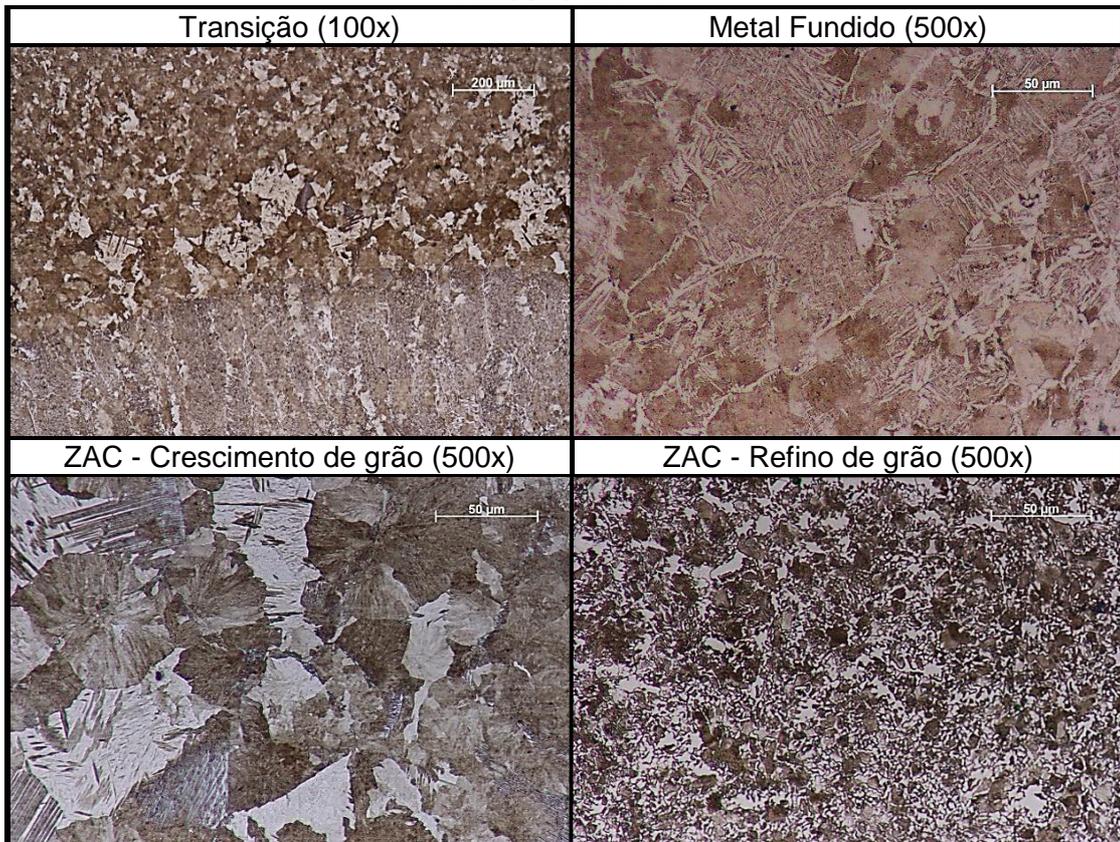
Apêndice II – Microestruturas dos cordões.

Amostra 1A – I 1º



Amostra 1A – F 1º**Amostra 1A – I 2º**

Amostra 1A – F 2º**Amostra 2A – I**

Amostra 2A – F**Metal Base**